

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0355

张雪莲, 赵永志, 廖洪, 李晓娜, 张国芳, 文方芳, 刘自飞, 张梦佳. 植物篱及过滤带防治水土流失与面源污染的研究进展. 草业科学, 2019, 36(3): 677-691.

ZHANG X L, ZHAO Y Z, LIAO H, LI X N, ZHANG G F, WEN F F, LIU Z F, ZHANG M J. Research advances in using plant hedges and filter strips to reduce soil and water erosion and non-point pollution. Pratacultural Science, 2019, 36(3): 677-691.

植物篱及过滤带防治水土流失与 面源污染的研究进展

张雪莲¹, 赵永志¹, 廖洪¹, 李晓娜², 张国芳², 文方芳¹, 刘自飞¹, 张梦佳¹

(1. 北京市土肥工作站, 北京 100029; 2. 北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097)

摘要: 坡耕地极易发生土壤侵蚀, 由此带来的水土流失及农业面源污染严重制约了丘陵地区生态环境质量。坡面构建植物篱或过滤带可通过植物、土壤及微生物的共同作用增强土壤入渗、拦截径流和泥沙、过滤氮磷及污染物, 是预防坡耕地水土流失、保护生态环境质量的有效手段。本文在整理分析国内外大量文献的基础上, 系统总结了不同植物篱和过滤带对径流、泥沙、氮、磷, 以及污染物的阻控效果, 分析了该技术阻控效果的影响因素, 并深刻阐述了植物篱对水土流失的阻控机理, 最后分析了目前存在的问题, 提出了进一步的研究建议, 以期为植物篱或过滤带技术的理论研究及应用提供参考, 为丘陵地区耕地可持续利用、生态农业建设提供依据。

关键词: 植物篱; 过滤带; 水土流失; 面源污染; 氮; 磷; 泥沙

中图分类号: S157; X501

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)03-0677-15

Research advances in using plant hedges and filter strips to reduce soil and water erosion and non-point pollution

ZHANG Xuelian¹, ZHAO Yongzhi¹, LIAO Hong¹, LI Xiaona², ZHANG Guofang²,
WEN Fangfang¹, LIU Zifei¹, ZHANG Mengjia¹

(1. Beijing Soil and Fertilizer Extension Service Station, Beijing, 100029, China;

2. Beijing Research & Development Center for Grass and Environment, Beijing 100097, China)

Abstract: Soil erosion on sloping land induces soil and water loss and non-point pollution, causing serious adverse effects on ecology and environment quality in hilly areas. Use of plant hedges or filter strips is an effective method to prevent soil and water loss and to protect ecology and environment quality. It can effectively increase soil infiltration and reduce the runoff, sediment, nitrogen (N), phosphorus (P), and pollutants through the combined action of plants, soil, and microorganisms. This manuscript summarizes the effect of different plant hedges and filter strips in reducing the runoff, sediment, N, P, and pollutants, analyzes the associated impact factors, discusses the interrupting mechanisms, and, finally, proposes contents that need further study in the future. It can provide a reference for further research and the application of plant hedges or filter strip technology and provides evidence for sustainable utilization of cultivated land and ecological agriculture construction in hilly areas.

收稿日期: 2018-06-11 接受日期: 2018-09-10

基金项目: “十三五”水体污染控制与治理国家科技重大专项“北运河上游水环境治理与水生生态修复综合示范”(2017ZX07102-001); 公益性行业(农业)科研专项(201503106)

第一作者: 张雪莲(1982-), 四川达州人, 高级农艺师, 博士, 主要从事化肥面源污染防控技术与推广。E-mail: xlzhang2001@126.com

通信作者: 李晓娜(1977-), 山西翼城人, 副研究员, 博士, 主要从事生态恢复与重建的研究。E-mail: lxn1977@126.com

Keywords: plant hedges; filter strips; soil erosion; non-point pollution; nitrogen; phosphorus; sediment

Corresponding author: LI Xiaona E-mail: lxn1977@126.com

据第二次全国土壤普查(1979–1985年),我国耕地水土流失面积达 $4.54 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占耕地总面积的 35%, 每年由水土流失造成的氮、磷损失总量分别为 1.28×10^7 和 $7.65 \times 10^6 \text{ t}$, 对地表水富营养化的贡献率超过了 50%^[1-2]。在地形复杂、降水量充沛的南方热带和亚热带地区, 极易通过水蚀引发水土流失, 影响土地可持续利用和生态环境质量, 因而迫切需要加强耕地的水土保持, 阻控氮、磷和农药等向水体输入, 防止土地和水体质量进一步恶化。

植物篱和过滤带是防治水土流失和面源污染的主要生物屏障措施。植物篱一般为等高草篱, 是指在坡耕地中以某一间距(3~5 m, 取决于坡度、土壤特征、降水特征、草篱特征等多种因素)沿等高线种植的草带(通常为双行, 宽度小于 3 m)^[3], 尤其适用于水蚀坡耕地。植被过滤带是位于农田与地表水体之间的带状植被区域, 又称植被缓冲带。它们通过植物茎秆的拦截、土壤的渗透及微生物的分解等多重作用实现挡水、挡土、降流、减污, 减缓和控制农业区域的水、土、营养元素及污染物向水体的迁移。研究表明, 两者在水土保持和面源污染防治中效果显著^[4-7]。Panagos 等^[8]认为, 植物篱带对侵蚀的控制效果甚至优于石墙等工程措施。草篱还具有明显的保水、保肥及作物增产效果, 实施数年能减少 80% 土壤养分流失, 增加作物产量 18%~35%^[9]。此外, 植物篱技术成本较低廉, 造价仅为 1 500~3 000 CNY·hm², 是石坎梯田造价的十分之一(一般大于 15 000 CNY·hm²)^[10]。因此, 在易发生水土流失的坡耕地, 尤其是水蚀严重的南方地区, 构建效果显著、成本低廉的植物篱和过滤带, 具有重要的价值和意义。

1 植物篱及过滤带对水土流失与面源污染的控制效果

植物篱及过滤带植物需具备较强的耐冲刷及改善土壤渗透性的能力, 因此, 适宜植物类型多为茎秆粗壮、分蘖能力强、根系发达的多年生植

物。常用篱带植物品种的名称、形态特征、分布及环境适宜性的汇总如表 1 所列。

1.1 植物篱及过滤带对径流和泥沙的拦截率

径流和泥沙是水土流失和面源污染发生的重要载体。近三十年来, 国内外科学家先后研究了不同植物篱对径流和泥沙的拦截效果, 其中, 研究最多的为香根草(*Vetiveria zizanioides*)。从不同植物篱对径流和泥沙的拦截率(表 2)可看出, 香根草植物篱不仅在我国南方红壤和紫色土坡耕地有较好的径流和泥沙拦截能力(红壤坡耕地分别可拦截径流和泥沙 29%~72% 和 56.25%~97.4%^[11-12], 紫色土坡耕地可分别拦截径流和泥沙 75% 和 83%^[13]), 而且在泰国北部沙壤中等坡度坡耕地也可拦截 72% 径流和 98% 泥沙^[14], 甚至在大于 30% 的陡坡对径流和泥沙的控制率也分别可达到 31%~69% 和 62%~86%^[15]。除香根草以外, 多种其他植物种类在不同地区也显示出较好的水土保持效果, 例如, 藤本植物野葛(*Pueraria lobata*)、百喜草(*Paspalum natatu*)、黄花菜(*Heimerocallis citrina*)和麦冬(*Ophiopogon japonicus*)在我国红壤坡耕地对径流的拦截率超过了 80%, 对泥沙拦截率也在 48% 以上^[16-17]; 皇竹草(*Pennisetum sinense*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、黄荆(*Vitex negundo*)、新银合欢(*Leucaena leucocephala*)和黄花菜在三峡库区紫色土对径流的拦截率在 22%~66%, 但对泥沙的拦截率高达 71%~98%^[18-19]; 金荞麦(*Fagopyrum dibotrys*)、李树(*Prunus salicina*)或黄花菜对贵州红壤径流和泥沙拦截率分别为 89% 和 40%~50%^[9]; 北京地区狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)和野古草(*Arundinella anomala*)植物篱对径流和泥沙的阻控率在 50% 以上^[3, 20-21]; 牛尾梢(*Festuca elatior*)草篱对美国深层黄土径流和泥沙的阻控率分别为 22%~52% 和 53%~63%^[22]; 0.5 m 宽的芒属草篱使沙壤土侵蚀量降低了 90%^[23]。

过滤带对径流和泥沙的拦截效果也十分显著, 单一高羊茅(*Festuca elata*)过滤带、高羊茅与柳枝稷(*Panicum virgatum*)混种过滤带对泥沙拦截率分

表 1 植物篱及过滤带中常用的植物品种、形态特性及其环境适宜性
Table 1 Species, shape and growth environment of plant used in plant hedges and filter strips

植物名称 Plant name	形态特征 Morphological character	分布及环境适宜性 Spread and environmental suitability
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	多年生，株高 30~120 cm，须根发达 Perennial, height 30~120 cm, fibrous root developed	世界均有分布；对土壤适应性强，耐干旱贫瘠 Spread worldwide, strong soil suitability; resistant to drought and barren conditions
野古草 <i>Arundinella anomala</i>	多年生，株高 60~120 cm，须根粗壮 Perennial, height 60~120 cm, fibrous root strong	除新疆和青海外的全国各省区 Spread in China except for Xinjiang and Qinghai
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	多年生，株高 30~90 cm，须根发达，分蘖多 Perennial, height 30~90 cm, fibrous root developed, strong tillers	分布于克什米尔地区、巴基斯坦、欧洲、亚洲暖温带、非洲北部；适宜的土壤 pH 为 6~7 Spread in Kashmir, Pakistan, Europe, Asia, and the north of Africa (i.e., in the warm temperate zone), suitable soil pH 6~7
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	多年生，根系发达，株高 1~2 m，分蘖强 Perennial, root system developed, height 1~2 m, strong tillers	主要分布于热带、亚热带地区；耐旱耐贫瘠 Spread in tropical and subtropical regions; resistant to drought and barren conditions
皇竹草 <i>Pennisetum sinense</i>	多年生，株高 4~5 m，须根发达，分蘖强 Perennial, height 4~5 m, fibrous root developed, strong tillers	主要分布于热带、亚热带地区 Spread in tropical and subtropical regions
牛尾梢草 <i>Festuca elatior</i>	多年生，株高 0.5~2 m，须根坚韧粗壮 Perennial, height 0.5~2 m, strong fibrous roots	我国东北、华北、西北及世界各地；耐寒，耐旱 Northeast, north, northwest of China, and worldwide; resistant to cold and drought conditions
百喜草 <i>Paspalum natatu</i>	多年生，匍匐茎，枝条高 15~80 cm，根系发达 Perennial, creeping stem, branch height 15~80 cm, root system developed	适宜于热带、亚热带地区 Suitable for tropical and subtropical regions
黄花菜 <i>Hemerocallis citrina</i>	多年生，株高 30~65 cm，根簇生，根端膨大 Perennial, height 30~65 cm, fascicular root, bentonite root	我国南方及山西、山东、安徽 South of China, Shanxi, Shandong and Anhui
麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	多年生，株高 30 cm，须根，肉质块根 Perennial, height 30 cm, fibrous roots, fleshy tuber root	我国西南、长三角、珠三角地区 Westsouth of China, Yangtze River Delta and Pearl River Delta
新银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i>	株高 2~6 m height 2~6 m	台湾、福建、广东、广西和云南；耐旱 Taiwan, Fujian, Guangdong, Guangxi and Yunnan; resistant to drought conditions
紫穗槐 <i>AmorphafruticosaL</i>	株高 1~4 m height 1~4 m	我国东北、华北、西北及山东、安徽、江苏、河南、湖北、广西、四川等省区；抗逆性强 Northeast, north and northwest of China, Shandong, Anhui, Jiangsu, Henan, Hubei, Guangxi, Sichuan; strong resistance to adversity
马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	株高 1.5~2.5 m height 1.5~2.5 m	云南、贵州、四川、湖北、陕西、甘肃、西藏 Produced in Yunnan, Guizhou, Sichuan, Hubei, Shaanxi, Gansu and Tibet
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	株高 2~5 m height 2~5 m	长江以南 South of the Yangtze River
金荞麦 <i>Fagopyrum dibotrys</i>	株高 50~100 cm height 50~100 cm	陕西、江苏、浙江、湖北、湖南等省 Shaanxi, Jiangsu, Zhejiang, Hubei, Hunan etc.
野葛 <i>Pueraria lobata</i>	木质藤本 Woody vines	除新疆、西藏外，其余地区均有分布 Widespread in China except for Xinjiang and Tibet

别为 72% 和 91%^[7]；日本地区种植 0.5~3.0 m 蜈蚣草 (*Pteris vittata*) 过滤带可拦截 24%~73% 泥沙^[24]；尼日利亚香根草过滤带对径流和泥沙的拦截率分别为 63% 和 72%^[25](表 2)。而肯尼亚地区香根草过滤带对径流的拦截率约 12%，是尼日利亚相应结果的五分之一^[26]，这可能与肯尼亚地区降水量较大(年降水量 1 150 mm) 有关，但相同条件下，肯尼亚地区粘壤土坡面(坡度 8%) 种植狼尾草过滤带(株

表 2 植物篱及过滤带对径流和泥沙的拦截率
Table 2 Interrupting rate of runoff and sediment by plant hedges and filter strips

植物名称 Plant name	研究地区 Study area	种植情况 Plant pattern	土壤类型 Soil type	坡度 Slope/%	降雨强度 Rain intensity/ (mm·h ⁻¹)	拦截率		参考文献 Reference
						径流 Runoff	泥沙 Sediment	
高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i> Schreb	—	过滤带, 宽 8 m Filter, width 8 m	—	5	—	—	72	[7]
高羊茅 + 柳枝稷 <i>Festuca arundinacea</i> + <i>Panicum virgatum</i>	—	过滤带, 宽 7.3 m + 0.7 m Filter, width 7.3 m + 0.7 m	—	5	—	—	91	[7]
金荞麦/李树/黄花菜 <i>Fagopyrum dibotrys</i> /Prunus salicina/Hemerocallis citrina	贵州 Guizhou	植物篱, 单种, 金荞麦 20 cm × 20 cm 双行; 李树 550 cm × 200 cm; 黄花菜 20 cm × 20 cm 双行 Hedge, single plant, double line, 20 cm × 20 cm for <i>Fagopyrum dibotrys</i> , 550 cm × 200 cm for <i>Prunus salicina</i> , 20 cm × 20 cm for <i>Hemerocallis citrina</i>	红黄壤 Red and yellow soil	—	—	89	41~48	[9]
香根草 <i>vetiveria zizanioides</i>	江西 Jiangxi	植物篱, 3 行, 行、株距均为 15 cm Hedge, three lines, row and plant spacing 15 cm	红壤 Red soil	6	—	60~72	56~78	[11]
	江西 Jiangxi	植物篱, 双行, 37 cm × 15 cm Hedge, double line, 37 cm × 15 cm	红壤 Red soil	10	—	29~40	63~97	[12]
	泰国 Thailand	植物篱, 宽 2 m, 高 3 m, 长 10.44/8.08/ 6.71 m Hedge, width 2 m, height 3 m, length 10.44/8.08/6.71 m	—	30/ 40/ 50	35~160	31~69	62~86	[13]
	三峡 Three Gorges	植物篱, 双行, 株、行距 20 cm Hedge, double line, row spacing 20 cm	紫色土 Purple soil	25	66~84	75	83	[14]
野葛(藤本)/百喜草 <i>Pueraria lobata</i> /Paspalum natatu	泰国北部 North of Thailand	植物篱, 株、行距 25 cm × 75 cm Hedge, plant × row 25 cm × 75 cm	沙壤土 Silt loam soil	21~28	—	72	98	[15]
	江西 Jiangxi	种植小区 Plant plot	红壤 Red soil	21	—	>80	>80	[16]
	浙江 Zhejiang	植物篱, 单种单行或双行, 混种双行; 15 cm × 40 cm Hedge, single plant single row, mixed double row, 15 cm × 40 cm	红壤 Red soil	—	25.6~56.9	—	48~80	[17]
皇竹草 <i>Pennisetum sinense</i>	三峡 Three Gorges	植物篱, 株、行距 30 cm × 30 cm 双行错栽 Hedge, plant × row 30 cm × 30 cm, double row transplanting	紫色土 Purple soil	25	4.74~15.6	59~66	71~78	[18]
马桑(黄荆)/新银合欢/黄花菜 <i>Coriaria nepalensis</i> /Vitex negundo/Leucaena leucocephala/Hemerocallis	三峡 Three Gorges	植物篱, 双行错栽 Hedge, double row transplanting	紫色土 Purple soil	25	42, 84	22~43	94~98	[19]

续表 2
Table 2 (Continued)

植物名称 Plant name	研究地区 Study area	种植情况 Plant pattern	土壤类型 Soil type	坡度 Slope/%	降雨强度 Rain intensity/ (mm·h ⁻¹)	拦截率 Intercept rate/% 径流 泥沙 Runoff Sediment		参考文献 Reference
野古草 <i>Arundinella anomala</i>	北京 Beijing	植物篱，双行，株高 71 cm Hedge, double line, height 71 cm 植物篱，双行，株高 71 cm Hedge, double line, height 71 cm 植物篱，双行，株高 95 cm Hedge, double line, height 95 cm	壤质黏土 Loam clay soil	5~20 5~20 5~20	3.1~52 22, 36, 63 3.1~52	54 7~82 73	64 40~92 86	[4] [20] [4]
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	北京 Beijing	植物篱，双行，株高 71 cm Hedge, double line, height 71 cm 植物篱，双行，株高 95 cm Hedge, double line, height 95 cm	壤质黏土 Loam clay soil	5~20 5~20	22, 36, 63 10~100	7~72 51~64	6~89 57~86	[20] [21]
牛尾梢草 <i>Festuca elatior</i>	美国 America	植物篱，0.72 m 宽 Hedge, width 0.72 m	黄土 Yellow soil	8~16	64	22~52	53~63	[22]
芒草 <i>Miscanthus</i>	—	植物篱，间距 20 cm × 20 cm Hedge, 20 cm × 20 cm apart	沙壤土 silt loam soil	5	—	39	87	[23]
蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i>	日本 Japan	带，长 0.5/1.0/3.0 m Filter, 0.5/1.0/3.0 m long	—	—	—	—	24~73	[24]
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	尼日利亚 Nigeria	过滤带，30 株，间距 10 cm Filter, 30 plant, spacing 10 cm	淋溶土 Leaching soil	7	—	63	72	[25]
	肯尼亚 Kenya	过滤带，行距 10~20 cm Filter, row spacing 10~20 cm	粘壤土 Clay loam soil	8	—	12	—	[26]
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	肯尼亚 Kenya	过滤带，行距 10~20 cm Filter, row spacing 10~20 cm	粘壤土 Clay loam soil	8	—	54	—	[26]
腐格里豆 + 甘蔗 <i>Gliricidia sepium</i> + <i>Saccharum</i> spp.	印度 India	植物篱 0.5 m × 0.5 m + 带行距 0.3 m Hedge, 0.5 m × 0.5 m + filter single row 0.3 m	红壤 Red soil	2~5	—	33	35	[27]
马氏桔梗(树) + 雪球荚(灌木) + 高羊茅(草) <i>Platanus hybrida</i> (trees) + <i>Viburnum opulus</i> (shrubs) + <i>Festuca arundinacea</i> (grass)	意大利北部 North-East Italy	过滤带，5 m，双行错栽，中间种草 Filter, 5 m, two rows of regularly alternating plant, with grass in the inter-rows	—	—	—	78	—	[29]
高羊茅 + 鸭茅 <i>Festuca arundinacea</i> + <i>Dactylis glomerata</i>	—	过滤带，1.1%~4.3% 的覆盖面积 Filter, 1.1%~4.3% coverage area	沙壤 Silt soil	5.5	—	54~79	67~84	[30]

“—”表示无相关数据。“—”，no date.

间距 15 cm) 对径流的拦截率为 54%^[26], 说明植物对径流的拦截效果受植物种类影响较大。研究还发现, 草篱和植被过滤带结合能更有效地防止坡耕地的水土流失, 印度腐格里豆 (*Gliricidia sepium*) 草篱与甘蔗 (*Saccharum* spp.) 过滤带结合对径流、泥沙和土壤碳的拦截率分别为 33%、35% 和 39%^[27], 高羊茅过滤带与柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 植物篱及窄草木过滤带结合两种处理保持水土效果显著, 并且, 在集中流下也能较大程度地降低水土流失^[28]。意大利北部马氏桔梗 (*Platycodon grandiflorus*) (树)、雪球荚迷 (*Viburnum opulus*) (灌木) 和高羊茅 (草) 混种过滤带可拦截 78% 的径流^[29]。

1.2 植物篱及过滤带对氮、磷营养元素的拦截率

从国内外植物篱及过滤带对总氮和总磷的拦截效果 (表 3) 可看出, 香根草草篱对南方红壤坡耕地 (3 行, 株行距 15 cm) 总氮流失的阻控率在 69%~90%^[11], 而在泰国北部 (25 cm × 75 cm) 对总氮流失的阻控率约为 30%^[14]。美国深层黄土种植牛尾梢草篱对总氮的阻控率约为 40%^[22], 效果略低于狼尾草和野古草, 但该草篱对铵氮的拦截可达 52%~60%^[22]。北京地区两个本地草种资源狼尾草和野古草对总氮和总磷的拦截率均在 50% 以上, 总氮和总磷的最佳拦截效果分别达到了 76% 和 88%^[4, 21]。植物篱除了可阻控坡耕地的化肥流失, 根据 Gilley 等^[33-34] 的研究, 植物篱还能够降低堆肥后有机肥施用坡面径流中的总磷、溶解态磷、总氮、硝态氮和铵态氮, 进而阻控施用有机肥中养分流失。

过滤带方面, 马氏桔梗 (树)、雪球荚 (灌木) 和高羊茅 (草) 混种过滤带 (5 m), 高羊茅与鸭茅结合过滤带 (1.1%~4.3% 覆盖率), 黑麦草 (*Lolium perenne*) 过滤带 (5 m) 对氮、磷的拦截效果显著, 可拦截 61%~74% 总氮和 47%~80% 总磷^[29-30, 32]。狼尾草过滤带对氮、磷也有较好的拦截效果 (总氮去除率 45%; 总磷去除率 54%)^[26], 该效果略低于狼尾草篱在北京地区对总氮 (50%~76%) 和总磷 (51%~88%) 的拦截效果^[4, 21], 这可能主要与肯尼亚地区降水量 (年降水量 1 150 mm) 高于北京地区 (多年平均降水量 640 mm) 有关。此外, 与泰国北部香根草篱氮、磷阻控效果较低 (约 30%) 类似, 香根草过滤带在肯尼亚、尼日利亚两个地区对氮、磷的拦截效果也很低 (6%~38%)^[25-26], 低于表 2 中香

根草在泰国北部及尼日利亚对径流和泥沙的拦截率, 分析可能与其中氮、磷的分配特征有关, 具体原因还有待进一步研究。

研究者还对植物篱和过滤带内拦截的氮、磷进行了形态分析。对磷而言, 研究发现高羊茅和鸭茅过滤带对颗粒磷和溶解磷的控制率分别为 66%~82% 和 66%~73%^[30]; 但也有学者指出, 植物篱对颗粒态磷的拦截率在 50%~97%, 对溶解态磷的拦截率变幅很大, 为 -83%~95% (负数表示溶解态磷可能增加), 篱内溶解态磷含量可能增加^[29, 33-38], 这可能是再侵蚀过程中磷的释放所致。对不同形态的氮而言, 香根草过滤带对肯尼亚粘壤土坡面径流中 NO₂-N、NO₃-N 和 NH₄-N 的降低率分别为 35%、11% 和 0, 狼尾草过滤带对相应化合物浓度的减少率分别为 570%、45% 和 47%^[26]。

1.3 植物篱及过滤带对污染物的拦截效果

施有机肥、喷洒农药可能导致农田一些污染物如重金属、兽药抗生素、农药残留污染。有关植物篱带对农田污染物流失控制的研究相对较少。Lin 等^[39] 研究了牛鞭草、柳枝稷等草本植物过滤带对农药和兽药抗生素的阻控率, 发现两种植物过滤带对径流中阿特拉津、异丙甲草酸和草甘膦的拦截率为 58%~72%, 对磺胺甲基嘧啶、泰乐菌素和恩诺沙星的拦截率超过了 70%。Soni 等^[40] 的研究表明, 种植草篱能够显著降低施用有机肥坡面径流中的抗生素和抗性基因丰度。国内关于植物篱和过滤带控制径流中农药和抗生素等污染物流失方面的研究尚十分匮乏, 北京地区的人工径流小区研究得出, 模拟和自然降水条件下, 狼尾草和野古草对阿特拉津流失的减少量为 90%^[31]。

综上所述, 禾本科植物的面源污染控制效果研究者最为关注, 并且研究表明禾本科植物对泥沙、氮磷及污染物的拦截效果较明显, 具有较大的应用潜力。

2 植物篱及过滤带防治水土流失与面源污染的影响因素

2.1 植物种类、过滤带宽度及植物生长状况的影响

用于控制水、土和污染物流失的篱带植物类型

表 3 植物篱及过滤带对氮、磷的拦截率
Table 3 Interrupting rate of nitrogen and phosphorus by plant hedges and filter strips

植物名称 Plant name	研究地区 Study area	种植情况 Plant pattern	土壤类型 Soil type	坡度 Slope/%	降雨强度 Rain intensity/(mm·h ⁻¹)	拦截率 Intercept rate/%		参考文献 Reference
						总氮 Total nitrogen	总磷 Total phosphorus	
野古草 <i>Arundinella anomala</i>	北京 Beijing	植物篱，双行，株高71 cm Hedge, double line, height 71 cm	壤质黏土 Loam clay soil	5~20	3.1~52	55	63	[4]
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	北京 Beijing	植物篱，双行，株高95 cm Hedge, double line, height 95 cm	壤质黏土 Loam clay soil	5~20	3.1~52	76	88	[4]
		植物篱，双行，株高95 cm Hedge, double line, height 95 cm		5~20	10~100	50~68	51~61	[21]
		植物篱，双行，株高71 cm Hedge, double line, height 71 cm		5~20	10~100	68	61	[31]
		植物篱，0.72 m宽 Hedge, width 0.72 m		黄土 Yellow soil	8~16	64	38~40	52~60
牛尾梢草 <i>Festuca elatior</i>	美国 America	植物篱，3行，行、株距均为15 cm Hedge, three lines, plant spacing 15 cm	红壤 Red soil	6	—	69~90	—	[11]
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	泰国北部 North of Thailand	植物篱，25 cm × 75 cm Hedge, 25 cm × 75 cm	沙壤土 Silt loam soil	21~28	—	27~32	—	[14]
		过滤带，30株，间距10 cm Filter, 30 plant, spacing 10 cm	淋溶土 Leaching soil	7	—	12~36	21~38	[25]
		过滤带，行距10~20 cm Filter, row spacing 10~20 cm	粘壤土 Clay loam soil	8	—	6	11	[26]
		过滤带，行距10~20 cm Filter, row spacing 10~20 cm	粘壤土 Clay loam soil	8	—	45	54	[26]
马氏桔梗(树) + 雪球菜 (灌木) + 高羊茅(草) <i>Platanus hybrida</i> (trees) + <i>Viburnum opulus</i> (shrubs) + <i>Festuca arundinacea</i> (grass)	意大利北部 North-East Italy	过滤带，5 m，双行错栽，中间种草 Filter, 5 m, two rows of regularly alternating plant, with grass in the inter- rows	—	—	—	74	80	[29]
高羊茅 + 鸭茅 <i>Festuca arundinacea</i> + <i>Dactylis glomerata</i>	—	过滤带，1.1%~4.3%的覆盖面积 Filter, 1.1%~4.3% covered	沙壤 Silt soil	5.5	—	—	68~76	[30]
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	浙江 Zhejiang	过滤带，宽 5 m Filter, width 5 m	红壤 Red soil	12.5	—	61	47	[32]

主要有草本和灌木，并以草本植物为主。关于两类植物防控效果的优劣存在争议。许开平等^[32]对草本和灌木拦截效果的比较研究得到，黑麦草篱对氮、磷的拦截量高于灌木篱。Schmitt等^[38]认为，多年生草本植物的拦截效果优于草本、灌木与乔木的混种。而其他学者认为木本和草本过滤带的拦截效果没有显著差异^[41-42]。Yuan等^[43]也指出草本植物与木本植物过滤带对泥沙的过滤能力相当。从表2的结果来看，马桑/黄荆/新银合欢等灌木类型植物篱对径流的拦截率均不到50%^[19, 44]。但是，大多数草本植物篱对径流的拦截率均超过了50%。总之，目前关于两种类型植物篱控制效果的优劣尚无定论。总体来看，草本植物尤其是丛生草本类型分蘖数目多，茎基部的密度和盖度大，拦截径流和泥沙的有效植物密度更大，生长繁殖速度快，可能更加适用于水、土和污染物流失控制。不同植物品种对水、土、氮和磷的控制效果也不同，狼尾草对径流和氮、磷的控制效果在北京地区明显优于野古草^[4, 20]，在肯尼亚地区明显优于香根草^[26]。

研究者考察了植物过滤带宽度对阻控效果的影响。Shiono得出小牛鞭草对泥沙的拦截效果随宽度增加而增加^[24]。然而，过滤带宽度在其发挥拦截泥沙和污染物的效果上存在阈值。Castelle等^[45]和Abu-Zreig等^[46]研究发现，随着过滤带宽度从4.6 m增加到22.4 m，对泥沙的拦截率从70%增加到了90%，但是，进一步将过滤带宽度增加到26.2 m和91.5 m，拦截效果反而降低为80%。类似地，Schmitt等^[38]也认为，大多数泥沙在过滤带的数米内被过滤和拦截。其他学者更明确地提出，53%~

86%的泥沙在初始的5 m内被过滤，在随后的5~10 m，泥沙的拦截能力下降了80%^[37, 47]。以上研究说明，只有在最适宽度下，过滤带才能发挥最佳阻控效果。然而，目前尚缺乏关于过滤带最佳尺寸设计的经验公式。过滤带宽度对化合物拦截程度的影响与化合物的类别有关。Ghadiri等^[48]的研究发现泥沙主要在过滤带入口方向和坡面的顶端累积，过滤带带宽(2和5 m)对土壤侵蚀量、溶解态磷、铵、总碳和溶解态碳有显著影响，但对径流中总氮、碱解氮、硝态氮和亚硝态氮的浓度没有显著影响。过滤带宽度对磷拦截程度的影响还与磷的形态有关。对于颗粒态磷，Syversen和Borch^[36]推荐的适宜于任何植物品种的最佳宽度为5~10 m，但是Kronvang等^[49]认为，考虑到土壤对颗粒态磷的吸附饱和，29 m的过滤带才能截留所有的颗粒态磷。对于溶解态磷，Schmitt等^[38]认为，由于强的迁移性，溶解态磷对过滤带宽度的要求比较高，只有当宽度大于15 m，对溶解态磷的拦截程度才比较明显(超过60%)(表4)。

篱带的阻控效果还受到植物覆盖度、生物量和种植年限等因素影响。根据室内的模拟研究，植物过滤带的覆盖度(植物覆盖面积与过滤带总面积之比)至少40%才能实现对80%的泥沙的截留，覆盖度在70%~80%，拦截率达到了临界值^[50]。香根草草篱对径流和泥沙的控制能力随香根草篱生物量的增加而增强，在0.75 kg·m⁻²干物质种植量下的控制能力最强^[15]。横峰野葛和百喜草植物篱对坡面径流和泥沙的阻控率随着植物的种植年限增加而增加^[16]。

表 4 植物篱及过滤带控制泥沙、营养物质流失的阈值
Table 4 The threshold of grass hedge and filter strip controlling sediment and nutrient erosion

参数 Parameter	最佳取值 Optimal value	泥沙最大拦截率 Maximum sediment interception rate/%	磷最大拦截率 Maximum phosphorus interception rate/%	参考文献 Reference
植物篱生物量 Grass hedge biomass	0.75 kg·m ⁻²	达到最佳 Up to optimal effect	—	[15]
	5 m	86	—	[37, 47]
过滤带宽度 Filter strip width	>15 m	—	>60	[38]
	22.4 m	90	—	[45-46]
	29 m	—	100	[49]
过滤带覆盖度 Filter strip coverage	70%~80%	达到临界值 Up to threshold	—	[50]

2.2 坡面地形的影响

对坡度与狼尾草和野古草篱下径流量、水土及养分流失量回归分析发现,坡面的径流量、水、土及养分流失量受到坡度的显著影响^[21]。狼尾草和野古草等高草篱对径流、泥沙和氮、磷的拦截效果随着坡度的增加而减弱^[4]。香根草草篱对土壤侵蚀量的阻控能力也受坡度的显著影响,但对径流的阻控能力与坡度没有明显的关系^[51]。红绒球(*Calliandra haematocephala*)和狼尾草在20%坡度下对泥沙的控制能力明显高于40%坡度下的控制能力^[5]。

2.3 降水强度及径流特征的影响

对降水强度与径流量、水、土及养分流失量回归分析得出,坡面的径流量、水土及养分流失量受到降水强度的显著影响^[21]。篱带在集中流下的拦截效果不如侵蚀下的拦截效果^[52]。当增大入水径流量,或者发生急速径流时,草篱的过滤效果大幅降低甚至消失^[28, 53]。

2.4 其他因素的影响

覆盖、免耕和施肥等农耕措施与植物篱带的结

合能增强篱带的阻控效果。研究表明,香根草草篱与稻草等覆盖结合显著增加了香根草篱的水土保持效果^[12, 54]。保护性耕作与草篱结合增加了狼尾草和野古草草篱对坡面径流、泥沙和氮、磷的拦截效果^[21]。免耕措施与狼尾草和野古草草篱结合能够增加草篱对径流中氮、磷和阿特拉津的去除率^[31]。施用化肥显著增强了香根草、新银合欢(*Leucaena leucocephala*)等植物的分蘖能力,促进了草篱的生长密闭,提高了对流失土壤的拦截效率^[14, 55-56]。带间施猪粪有机肥改善了土壤物理性质,尤其是增加了土壤渗透性能,增强了香根草草篱的水土保持效果。土壤质地也会对草篱的拦截效果产生影响,沙土种植草篱的拦截效果优于黏土上种植的草篱^[35, 47]。

3 植物篱对水土与污染物流失的控制过程与机理

植物篱对径流、泥沙及污染物流失的控制主要通过植物的拦截、过滤,吸收、利用,土壤的渗透、吸附以及微生物的分解、转化3个方面的协同作用(图1)。

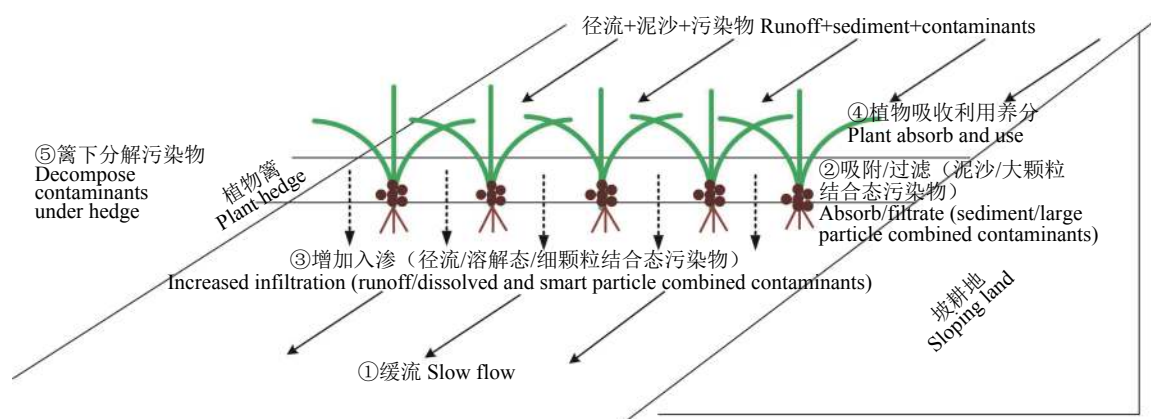


图1 植物篱对径流、泥沙及污染物的控制过程示意图

Figure 1 The control process of plant hedge toward runoff, sediment and contaminants

3.1 对径流的控制过程与机理

植物篱对径流的阻控主要通过两个方面的作用:1)篱内近地面的机械阻碍作用。一方面,植物茎秆能够阻碍径流,降低流速,实现缓流和分流。郭雨华等^[57]对草地坡面水动力学特性及减流机制研究表明,草地的阻力系数和糙率系数分别是裸地的4倍和2倍,径流流速明显低于裸地。另一方面,种植植物篱能逐渐改变坡面的微地形,

减缓坡度,形成土坎^[13, 44]。种植新银合欢、黄荆(*Vitex negundo*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)和木槿(*Hibiscus syriacus*)、黄花菜篱4年后,坡度从30%降至21%~24%,篱坎高超过了60 cm,此外,植物篱还能一定程度上缩短坡长^[58],这些微地形的改变能改变径流的产生过程,明显降低径流流速,减少侵蚀;2)增加径流向篱下土壤的入渗。雨水在篱内是否入渗取决于入水流速,径流

持续时间以及篱下近地面条件^[59]。种植篱带能通过植物根系作用维持土壤良好的渗透性, De Baets 等^[60]通过室内模拟植物篱地下部分的侵蚀过程发现, 草根种植一个月后, 根区分布的表层土壤在径流下的侵蚀速率与根密度和根长负相关, 表明植物篱的地下根保护了根区土壤, 减少了侵蚀。如百喜草、黄花菜植物篱篱带下在较长的时间内能维持高的土壤入渗量和较大的稳定入渗速率^[61]; 种植新银合欢/马桑/黄荆植物后, 土壤体积质量降低, 饱和导水率及就地入渗率增加^[44]; 栽种皇竹草使土壤通气状况明显改善, 土壤总重降低, 总孔隙度增加, 渗透速度和渗透系数较之对照高^[62], 种植 4 年的铁刀木 (*Cassia siamea*) 植物篱系统能增加 94% 的水分入渗, 下层土壤能增加 54% 的水分入渗; 毒鼠豆 (*Dichapetalum gelonioides*) 或木豆 (*Cajanus cajan*) 植物篱篱带种植 3 年后, 土壤团聚体的稳定性有提高, 密度减少; 狼尾草草篱使土壤容重降低 7.0%, 稳定入渗率和总孔隙度分别增加 157.1% 和 11.0%, 细颗粒含量 ($< 0.01 \text{ mm}$) 增加 10.8%^[63]。土壤渗透性的改善能增加径流的入渗率, 减少地表径流量。然而, 值得注意的是, 随着篱下土壤入渗径流的增加, 土壤持水量达到饱和, 对流失径流的阻控效果逐渐减弱或者无效, 径流的物理过程被改变^[64], 导致植物篱及过滤带对径流的减缓效果下降或者丧失。

3.2 对泥沙的控制过程与机理

雨水流速的减缓及入渗过程伴随着颗粒的沉积和拦截, 进而阻碍了颗粒物质的迁移^[65]。植物篱对泥沙的阻控过程与颗粒的大小有关, 大颗粒被截留的机会更高^[66-68], 并且植物对大颗粒的作用过程主要是阻挡作用。小牛鞭草拦截的泥沙主要为 0.02 mm 以上的颗粒^[24]。粗糙的大颗粒 ($> 20 \mu\text{m}$) 通常滞留在农田边缘 1 m 处或者篱前^[53]。相比较而言, 小颗粒被拦截程度较低, 主要被植物表面过滤或随着径流入渗进入篱下土壤^[59], 小牛鞭草几乎无法拦截 0.002 mm 以下的颗粒^[24]。值得一提的是, 当有连续径流产生的时候, 拦截和固持在篱的颗粒物可能被再侵蚀。

3.3 对氮的控制过程与机理

研究表明, 坡面氮流失的主要载体是 $< 0.02 \text{ mm}$

的微团聚体^[69]。申元村^[58]进一步揭示, 土壤氮主要随着粉砂粒 ($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$) 和粘粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 的流失而流失。由此推测, 植物篱对氮流失的控制可能主要是通过增加溶解态以及细颗粒物结合态氮的入渗。该推测被牛德奎等^[70]的研究证实, 由于硝态氮随着径流和土壤流动到草篱, 并被草篱拦截后, 入渗进入土壤, 导致人工降雨后, 野古草草篱土壤中硝态氮含量明显高于无草篱的对照。Pansak 等^[14]的研究也证实了这点, 他认为泰国北部山区中等坡度 ($21\% \sim 28\%$) 种植香根草、新银合欢等植物篱, 改变了氮的迁移途径, 氮由地表径流损失转变为渗漏。此外, 氮被植物拦截后可能会发生进一步的生物地球化学转化 (如反硝化、降解和分解), 从而逐渐减少残留的浓度^[58], 但是, 关于篱带内氮元素的生物地化转化过程的研究尚十分有限。

3.4 对磷的控制过程与机理

径流中磷的形态主要有两种: 颗粒态磷和溶解态磷。研究发现, 不同土壤类型坡面磷的损失都主要随泥沙迁移, 径流中全磷和速效磷的含量很低^[4, 59, 71-72]。其他研究也指出, 草篱对泥沙及颗粒态磷的拦截效果相当, 间接表明磷与土壤颗粒的强烈结合及迁移的一致性^[29, 36, 38]。并且, 对过滤带颗粒态磷含量分析发现, 过滤带拦截的粗沙颗粒 ($> 63 \mu\text{m}$) 中磷含量较低, 而与细颗粒结合的磷含量较高^[73]。更有研究者指出, 土壤砂粒 ($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$) 和粘粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 或者微团聚体 ($< 0.02 \text{ mm}$) 是径流中磷迁移的主要载体^[58, 69]。

两种形态的磷在篱带被阻控的过程和机制不同。颗粒态的磷, 尤其是与土壤大颗粒结合的磷被阻控的主要机制是植物茎秆的拦截, 拦截后固定在植物篱。小颗粒态的磷与溶解态磷的阻控机制类似, 其被阻控的主要机制是篱带内径流量减少, 两者在篱带内渗入土壤。入渗的磷元素通常只渗透到土壤表层。进入土壤并快速被土壤固体点位吸附, 进行缓慢的解吸和沉淀, 并最终被固持在土壤中。拦截的磷暂时保留在土壤中, 其动力学过程和保留程度受土壤 pH、有机质、温度、氧化还原电位、干湿交替、冻融-解冻以及与此有关的微生物分解活动的影响^[74-75]。短时间内, 被吸附的磷基本上没有形态的变化, 而长时间来看,

随着季节变化和生物的参与,可能发生磷的形态转化。土壤对磷的固持能力有限,受表面积(粘土矿物类型和数量)、土壤中沉淀磷酸盐的阳离子或络合物的有效性、温度及径流离子组成的影响,当土壤中磷达到饱和后,过量的磷会进一步的流失^[59,76]。篱内保留的磷可能被植物吸收转化为有机磷,并随着植物枯枝落叶的分解再次释放到土壤。植物篱对磷的保留取决于外因(气候,农业和地形因素引起的径流特征)和内因(地形,过滤带的宽度,坡度,植物和土壤的状态)。然而,有关径流中溶解的磷在植物篱下土壤的动力学过程及环境因素对土壤对磷的固持效果还需要更多深入的研究。

3.5 对污染物的控制过程与机理

氮和农药类污染物被植物拦截后可能会发生进一步的生物地球化学转化(如反硝化、降解和分解),从而逐渐减少残留的浓度^[59]。大多数农药被草篱拦截后能够在带内被吸附和降解,导致浓度进一步降低^[77]。

4 研究不足及展望

植物篱和过滤带技术能在一定程度上有效防治水土流失与面源污染,并且易实施、成本低廉,具有很大的应用价值。然而,目前的研究还存在如下不足:1)已有研究植物品种约十几种,除香根草和狼尾草资料比较丰富外,对其他生长能力强,分蘖快,适宜用作植物篱、过滤带的植物品种(柳枝稷、细叶芒等)的研究还较少;2)植物篱和过滤带拦截的氮、磷在篱带内的生物地球化学循环过程尚不清楚;3)对农田污染物如重金属、农药方面的研究较少。因此,笔者建议今后加强如下研究:1)更广泛地筛选植物篱和过滤带适宜品种,提高技术应用时植物种类的可选择性和丰富性;2)建议通过元素示踪等手段进一步开展篱带对耕地水土流失及面源污染防治机理研究,揭示氮、磷在坡面的迁移、分布规律,以及在篱带内土壤-植物-微生物系统中的迁移转化过程;3)开展草篱对农田污染物拦截研究。

参考文献 References:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 (2012). 北京: 中国统计出版社, 2012.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook (2012). Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [2] 中国水土保持公报, 中华人民共和国水利部, 2007.
China water and soil conservation bulletin, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2007.
- [3] 喻定芳, 戴全厚, 王庆海, 肖波. 北京地区等高草篱防治坡耕地水土及氮磷流失效果研究. 水土保持学报, 2010, 2(6): 11-15.
YU D F, DAI Q H, WANG Q H, XIAO B. Effect of contour grass hedges on soil, water and N, P nutrients loss on sloping croplands in Beijing. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 2(6): 11-15.
- [4] 张卫建, 郑建初, 江海东, 冯金侠, 吴魁, 何龙兴, 李小妹, 秦君明. 稻/草-鹅农牧结合模式的综合效益及种植技术初探. 草业科学, 2001, 18(5): 17-21.
ZHANG W J, ZHENG J C, JIANG H D, FENG J X, WU K, HE L X, LI X M, QIN J M. Comprehensive effects and cropping-feeding techniques in cropping-livestock system of rice/ryegrass-goose. Pratacultural Science, 2001, 18(5): 17-21.
- [5] ANGIMA S D. Study on the control effect of soil erosion by green hedge. Scientific and Technological Information of Soil and Water Conservation, 2001, 3(3): 10-11.
- [6] 蒋光毅, 史东梅, 卢喜平, 刘玉民. 紫色土坡地不同种植模式下径流及养分流失研究. 水土保持学报, 2004, 18(5): 54-58, 63.
JIANG G Y, SHI D M, LU X P, LIU Y M. Research on runoff and nutrient loss from slopeland of purples soil under different planting model. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5): 54-58, 63.
- [7] BLANCO-CANMQUI H, GANTER C J, ANDERSON S H, ALBERTS E E. Grass barriers for reduced concentrated flow induced soil and nutrient loss. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1963-1972.
- [8] PANAGOS P, BORRELLI P, MEUSBURGER K. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. Environmental Science and Policy, 2015, 51: 23-34.

- [9] 陈正刚, 朱青, 王文华, 李剑. 南方红黄壤区经济植物篱配合平衡施肥的水土保持效应研究. [水土保持研究](#), 2006, 13(5): 248-251.
- CHEN Z G, ZHU Q, WANG W H, LI J. Effect of soil and water conservation with balance fertilization combined with economic plant hedge in southern red-yellow soil area. [Research of Soil and Water Conservation](#), 2006, 13(5): 248-251.
- [10] 蔡强国, 卜崇峰. 植物篱复合农林业技术措施效益分析. [资源科学](#), 2004, 26(S): 7-12.
- CAI Q G, BU C F. Benefit of hedgerow agro-forestry technical measure. [Resources Science](#), 2004, 26(S): 7-12.
- [11] 黄欠如, 章新亮, 李清平, 余喜初, 贺湘逸, 周慕卿. 香根草篱防治红壤坡耕地侵蚀效果的研究. [江西农业学报](#), 2001, 13(2): 40-44.
- HUANG Q R, ZHANG X L, LI Q P, YU X C, HE X Y, ZHOU M Q. Control effect of hedge of vetiver grass on red soil sloping land erosion. [Acta Agriculturae Jiangxi](#), 2001, 13(2): 40-44.
- [12] 范洪杰, 黄欠如, 秦江涛, 章新亮, 刘满强. 稻草覆盖和草篱对红壤缓坡旱地水土流失及作物产量的影响. [土壤](#), 2014, 46(3): 550-554.
- FAN H J, HUANG Q R, QIN J T, ZHANG X L, LIU M Q. Effects of straw mulching and vetiver hedge on runoff, soil erosion and crop yield on red soil sloping land. [Soils](#), 2014, 46(3): 550-554.
- [13] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 张光远, 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽. 高植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点. [土壤学报](#), 2002, 39(1): 71-80.
- XU F, CAI Q G, WU S A, ZHANG G Y, CAI C F, DING S W, SHI Z H, HUANG L. Characteristics of erosion control by contour hedgerows on cultivated slope land of purplish soil. [Acta Pedologica Sinica](#), 2002, 39(1): 71-80.
- [14] PANSAK W, HILGER T H, DERCON G. Changes in the relationship between soil erosion and N loss pathways after establishing soil conservation systems in uplands of Northeast Thailand. [Agriculture, Ecosystems and Environment](#), 2008, 128: 167-176.
- [15] DONJADEE S, TINGSANCHALI T. Reduction of runoff and soil loss over steep slopes by using vetiver hedgerow systems. [Paddy and Water Environment](#), 2013, 11(1/4): 573-581.
- [16] 范淑英, 吴才君, 曲雪艳. 野葛及百喜草对红壤坡地水土保持及土壤改良的效应. [中国生态农业学报](#), 2005, 13(4): 191-193.
- FAN S Y, WU C J, QU X Y. Effect of wild pueraria and bahia grass on soil and water conservation in red soil of hilly land. [Chinese Journal of Eco-Agriculture](#), 2005, 13(4): 191-193.
- [17] 张沛, 严力蛟, 樊吉, 姜芑, 邬岳阳, 徐奂, 王锡金, 伍少. 不同草篱种植模式对土壤侵蚀的控制效应. [生态与农村环境学报](#), 2011, 27(3): 29-34.
- ZHANG P, YAN L J, FAN J, JIANG F, WU Y Y, XU H, WANG X J, WU S. Effects of different patterns of contour grass hedgerow on soil erosion control. [Journal of Ecology and Rural Environment](#), 2011, 27(3): 29-34.
- [18] 廖晓勇, 罗承德, 陈治谏, 王海明. 三峡库区坡地果园间植草篱的水土保持效应. [长江流域资源与环境](#), 2008, 17(1): 152-156.
- LIAO X Y, LUO C D, CHEN Z J, WANG H M. Functions of soil and water conservation by grass hedgerow intercropping of slope orchard in three gorges reservoir area. [Resources and Environment in the Yangtze Basin](#), 2008, 17(1): 152-156.
- [19] 蔡强国, 吴淑安. 紫色土陡坡地不同土地利用对水土流失过程的影响. [水土保持通报](#), 1998, 18(2): 1-8, 35.
- CAI Q G, WU S A. Effect of different land use on soil and water loss processes on purple steep slopeland. [Bulletin of Soil and Water Conservation](#), 1998, 18(2): 1-8, 35.
- [20] 黄传伟, 牛德奎, 黄顶, 武菊英, SARDO V. 草篱对坡耕地水土流失的影响. [水土保持学报](#), 2008, 22(6): 40-43.
- HUANG C W, NIU D K, HUANG D, WU J Y, SARDO V. Effects of grass hedgerows on runoff and soil erosion on slope land. [Journal of Soil and Water Conservation](#), 2008, 22(6): 40-43.
- [21] 肖波, 喻定芳, 赵梅, 王庆海, 申小波. 保护性耕作与等高草篱防治坡耕地水土及氮磷流失研究. [中国生态农业学报](#), 2013, 21(3): 315-323.
- XIAO B, YU D F, ZHAO M, WANG Q H, SHEN X B. Effects of conservation tillage and grass-hedge on soil, water, nitrogen and phosphorus loss in sloping cropland. [Journal of Soil and Water Conservation](#), 2013, 21(3): 315-323.
- [22] EGHBALL B, GILLEY J E, KRAMER L A, MOORMAN T B. Effect of grass hedge on nitrogen and phosphorus in runoff. [Scientific and Technological Information of Soil and Water Conservation](#), 2001, 4: 7-13.
- [23] CULLUMA R F, WILSON G V, MCGREGOR K C, JOHNSON J R. Runoff and soil loss from ultra-narrow row cotton plots

- with and without stiff-grass hedges. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93: 56-63.
- [24] SHIONO T, YAMAMOTO N, HARAGUCHI N. Performance of grass strips for sediment control in Okinawa. *Jaro-Japan Agricultural Research Quarterly*, 2007, 41(4): 291-297.
- [25] BABALOLA O, OSHUNSANYA S O, ARE K. Effects of vetiver grass (*Vetiveria nigriflora*) strips, vetiver grass mulch and an organomineral fertilizer on soil, water and nutrient losses and maize (*Zea mays*) yields. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96: 6-18.
- [26] OWINO J O, OWIDO S F O, HEMELIL M C. Nutrients in runoff from a clay loam soil protected by narrow grass strips. *Soil and Tillage Research*, 2006, 88: 116-122.
- [27] LENKA N K, SUDHISHRI A D S, PATNAIK U S. Soil carbon sequestration and erosion control potential of hedgerows and grass filter strips in sloping agricultural lands of eastern India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 158: 31-40.
- [28] BLANCO-CANQUI H, GANTZER C J, ANDERSON S H. Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1670-1678.
- [29] BORIN M, VIANELLO M, MORARI F. Effectiveness of buffer strips in removing pollutants in runoff from a cultivated field in North East Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 105(1-2): 101-114.
- [30] AL-WADAEY A, WORTMANN C S, FRANTI T G, SHAPIRO C A, EISENHAUER D E. Effectiveness of grass filters in reducing phosphorus and sediment runoff. *Water, Air and Soil Pollution*, 2012, 223: 5865-5875.
- [31] 李霞, 陶梅, 肖波, 王庆海, 陈建平. 免耕和草篱措施对径流中典型农业面源污染物的去除效果. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 221-224.
- LI X, TAO M, XIAO B, WANG Q H, CHEN J P. Effects of grass hedges and no-tillage practice on the removing of typical agricultural non-point source pollutants from runoff. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 221-224.
- [32] 许开平, 吴家森, 黄程鹏, 姜培坤. 不同植物篱在减少雷竹林氮磷渗漏流失中的作用. *土壤学报*, 2012, 49(5): 980-987.
- XU K P, WU J S, HUANG C P, JIANG P K. Effect of hedgerows reducing of nitrogen and phosphorus leaching loss from phyllostachys praecox stands. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 980-987.
- [33] GILLEY J E, EGHBALL B, MARX D B. Narrow grass hedge effects on nutrient transport following compost application. *Transactions of the Asabe*, 2008, 51(3): 997-1005.
- [34] GILLEY J E, DURSO L M, EIGENBERG R A. Narrow grass hedge control of nutrient loads following variable manure application. *Transactions of the Asabe*, 2011, 54(3): 847-855.
- [35] SCHWER C B, CLAUSEN J C. Vegetative filter treatment of dairy milk house wastewater. *Journal of Environmental Quality*, 1989, 18: 446-451.
- [36] SYVERSEN N, BORCH B. Retention of soil particle fractions and phosphorus in cold-climate buffer zones. *Ecological Engineering*, 2005, 25(4): 382-394.
- [37] DILLAHA T A, INAMDAR S P. Buffer zones as sediment traps or sources. // In: Haycock N, Burt T, Goullding K, Pinay, G. Buffer zones: their processes and potential in water protection. Harpenden Hertfordshire, UK: Quest Environmental, 1997: 33-42.
- [38] SCHMITT T J, DOSSKEY M G, HOAGLAND K D. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28: 1479-1489.
- [39] LIN C H, LERCH R N, GOYNE K W. Reducing herbicides and veterinary antibiotics losses from agroecosystems using vegetative buffers. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(3): 791-799.
- [40] SONI B, BARTELT-HUNT S L, SNOW D D, GILLEY J E, WOODBURY B L. Narrow grass hedges reduce tylosin and associated antimicrobial resistance genes in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(3): 895-902.
- [41] COOPER J R, GILLIAM J W, JACOBS T C. Riparian areas as a control of nonpoint pollutants. // In: Correll D L. Watershed Research Perspectives. Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1986, 166-192.
- [42] DANIELS R B, GILLIAM J W. Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(1): 246-251.
- [43] YUAN Y P, BINGNER R L, LOCKE M A. A review of effectiveness of vegetative buffers on sediment trapping in agricultural areas. *Ecohydrology*, 2009, 2(3): 321-336.
- [44] 彭熙, 李安定, 李苇洁, 卢兰. 不同植物篱模式下土壤物理变化及其减流减沙效应研究. *土壤*, 2009, 41(1): 107-111.

- PENG X, LI A D, LI W J, LU L. Changes of soil physical properties, runoff and soil erosion under different hedgerow system. *Soils*, 2009, 41(1): 107-111.
- [45] CASTELLE A J, JOHNSON A W, CONOLLY C. Wetlands and stream buffer size requirements: A review. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 878-882.
- [46] ABU-ZREIG M, RUDA R P, WHITELEY H R, ALONDEL M N, KAUSHIK N K. Phosphorus removal in vegetated filter strip. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 613-619.
- [47] MAGETTE W L, BRINSFIELD R B, PALMER R E. Nutrient and sediment removal by vegetated filter strip. *Transactions of the Asae*, 1989, 32(2): 663-667.
- [48] GHADIRI H, HUSSEIN J, ROSE C W. Effect of pasture buffer length and pasture type on runoff water quality following prescribed burning in the Wivenhoe Catchment. *Soil Research*, 2011, 49(6): 513-522.
- [49] KRONVANG B, LAUBEL A R, LARSEN S E, IVERSEN H L, HANSEN B. Soil erosion and sediment delivery through buffer zones in Danish slope units. In: STONE M. The Role of Erosion and Sediment Transport in Nutrient and Contaminant Transfer. Wallingford, Oxfordshire, UK: International Association of Hydrological Sciences, 2000, 263: 67-73.
- [50] SCHUMM R R D, SCHUMM S A. The effect of sparse vegetative cover on erosion and sediment yield. *Journal of Hydrology*, 1991, 123: 19-24.
- [51] DONJADEE S, CHINNARASRI C. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27(2): 168-177.
- [52] BLANCO-CANQUI H, GANTZER C J, ANDERSON S H. Performance of grass barriers and filter strips under interrill and concentrated flow. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(6): 1969-1974.
- [53] PEARCE R A, TRILICA M J, LEININGER W C. Efficiency of grass buffer strips and vegetation height on sediment filtration in laboratory rainfall simulation. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 139-144.
- [54] 钟义军, 叶川, 黄欠如, 章新亮, 武琳, 孙永明, 秦江涛. 红壤缓坡花生地不同水土保持措施效果分析. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 71-74.
- ZHONG Y J, YE C, HUANG Q R, ZHANG X L, WU L, SUN Y M, QIN J T. Benefit analysis of different soil and water conservation measures at sloping *Arachis hypogaea* land with red soil. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(3): 71-74.
- [55] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 张光远, 丁树文, 蔡崇法. 三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究: 以等高植物篱为例. *地理研究*, 2000, 19(3): 303-310.
- XU F, CAI Q G, WU S A, ZHANG G Y, DING S W, CAI C F. A study on soil nutrient loss control by slope eco-engineering in the Three Gorges Reservoir region: Taking the contour hedgerows as an example. *Geographical Research*, 2000, 19(3): 303-310.
- [56] 夏锦慧, 陈旭晖, 王文华. 施肥对香根草篱长势及护土保水效果的影响. *贵州农业科学*, 2002, 30(5): 31-32.
- XIA J H, CHEN X H, WANG W H. Effects of fertilization on vetiver grass hedgerow growth and its water and soil conservation. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2002, 30(5): 31-32.
- [57] 郭雨华, 赵廷宁, 孙保平, 丁国栋, 成晨, 胡封兵. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 264-267.
- GUO Y H, ZHAO T N, SUN B P, DING G D, CHENG C, HU F B. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4): 264-267.
- [58] 申元村. 三峡库区植物篱坡地农业技术水土保持效益研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(2): 61-66.
- SHEN Y C. Study on soil and water conservation benefit of agricultural technology of hedgerows in the three gorges areas. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(2): 61-66.
- [59] DORIOZ J M, WANG D, POULENARD J, TREVISAN D. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics: A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 117: 4-21.
- [60] DE-BAETS S, POESEN J, GYSSELS G. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, 76(1-2): 54-67.
- [61] 李新平, 王兆骞, 陈欣, 方志国. 红壤坡耕地人工模拟降雨条件下植物篱笆水土保持效应及机理研究. *水土保持学报*, 2002,

- 16(2): 36-40.
- LI X P, WANG Z Q, CHEN X, FANG Z G. Research on soil and water conservation effect and mechanism of hedges under rainfall simulation in red soil slope field. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 36-40.
- [62] 廖晓勇, 陈治谏, 刘邵权, 陈国阶. 陡坡地皇竹草水土保持效益研究. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 34-36.
- LIAO X Y, CHEN Z J, LIU S Q, CHEN G J. Benefit of soil and water conservation of hybrid giant napier on abrupt slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(4): 34-36.
- [63] 肖波, 王慧芳, 王庆海, 武菊英, 滕文军, 戴全厚. 坡耕地上等高草篱的功能与效益综合分析. *中国农业科学*, 2012, 45(7): 1318-1329.
- XIAO B, WANG H F, WANG Q H, WU J Y, TENG W J, DAI Q H. Functions and cost benefits of contour grass hedges on sloping croplands. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(7): 1318-1329.
- [64] BARFIELD B J, TOLLNER E W, HAYES J C. Filtration of sediment by simulated vegetation. Part I: steady-state flow with homogeneous sediment. *Transactions of the Asae*, 1979, 22(5): 540-545.
- [65] MUNOS-CARPENA R, PARSONS J E, GILLIAM J W. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *Journal of Hydrology*, 1999, 214: 111-129.
- [66] HAYES J C, BARFIELD B J, BARNHISEL R I. Filtration of sediment by simulated vegetation. Part II: unsteady flow with non-homogeneous sediment. *Transactions of the Asae*, 1979, 22(5): 1063-1067.
- [67] ROBINSON C A, GHAFARZADEH M, CRUSE R M. Vegetative filter strip effects on sediment concentration in cropland runoff. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 50: 227-230.
- [68] 朱远达, 蔡强国, 张光远, 胡霞. 植物篱对土壤养分流失的控制机理研究. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(4): 345-351.
- ZHU Y D, CAI Q G, ZHANG G Y, HU X. Impact of hedgerow on the control of soil nutrient loss. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2003, 12(4): 345-351.
- [69] 黄丽, 丁树文, 张光远. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 8-13.
- HUANG L, DING S W, ZHANG G Y. Study on nutrient losses of purple soil in three gorges reservoir region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(1): 8-13.
- [70] 牛德奎, 黄传伟, 武菊英. 草篱对坡耕地水土流失和土壤养分的影响. *安徽农业科学*, 2009, 37(7): 3079-3081, 3084.
- NIU D K, HUANG C W, WU J Y. Effects of grass hedgerow on the soil and water loss and soil nutrient of slope land. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(7): 3079-3081, 3084.
- [71] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕影响坡地磷流失试验研究. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 443-448.
- LI Y Y, SHAO M A. Effect of soil tillage on phosphorus loss from slope land: An experimental study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 443-448.
- [72] 陈皓, 章申. 黄土地区氮磷流失的模拟研究. *地理科学*, 1991, 11(2): 142-149.
- CHEN H, ZHANG S. Nitrogen and phosphorus movement from loess tillage under modelling the rainfall-runoff erosion processes. *Scientific Geographica Sinica*, 1991, 11(2): 142-149.
- [73] QWENS P N, DUZANT J H, DEEKS L K. Evaluation of contrasting buffer within an agricultural landscape for reducing sediment and sediment-associated phosphorus delivery to surface waters. *Soil Use and Management*, 2007, 23: 165-175.
- [74] PERROTT K W, SARATHCHANDRA S U, WALLER J E. Seasonal storage and release of phosphorus and potassium by organic matter and the microbial biomass in a high-producing pastoral unit. *Australia Journal of Soil Research*, 1990, 28: 593-608.
- [75] SHENKER M, SEITELBACH S, BRAND S, HAIM A, LITAOR M I. Redox reactions and phosphorus release in re-flooded soils of an altered wetland. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56: 515-527.
- [76] SANYAL S K, DE-DATTA S K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. *Advance of Soil Science*, 1991, 16: 1-120.
- [77] KRUTZ L J, SENSEMAN S A, ZABLOTOWICZ R M, MATOCHA M A. Reducing herbicide runoff from agricultural fields with vegetative filter strips: A review. *Weed Science*, 2005, 53(3): 353-367.

(责任编辑 张瑾)